

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

Pevnostní kontrola sudu na víno objemu 100 tisíc l
umístěného na zámku Mikulov

Stress Analysis of the Wine Barrel of 100 Thousand
l Located at Mikulov Castle

Student

Martin Pončík

Vedoucí bakalářské práce

prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.

Ostrava

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechaniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Pončík**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika
Téma: Pevnostní kontrola sudu na víno objemu 100 tisíc l umístěného na
zámku Mikulov
Stress Analysis of the Wine Barrel of 100 Thousand l Located at
Mikulov Castle

Zásady pro vypracování:

- 1) Zjištění rozměrů sudu na základě služební cesty
- 2) Stanovení materiálových charakteristik materiálu sudu
- 3) Vytvoření výpočtového modelu bez uvážení ocelových pásů
- 4) Doplnění výpočtového modelu o ocelové výztužné pásy
- 5) Zhodnocení výsledků numerických simulací
- 6) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

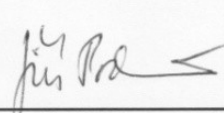
- 1) ANSYS® ANSYS Academic Research, Release 12.0, Help System

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.**

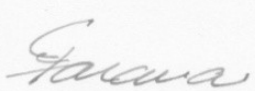
Datum zadání: 30.11.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, же Высoкá škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě :

.....

podpis studenta

Martin Pončík

Hovězí 666

Okres: Vsetín

Anotace bakalářské práce

Pončík M. Pevnostní kontrola sudu na víno objemu 100 tisíc l umístěného na zámku Mikulov, bakalářské práce. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2011, Bakalářská práce, Vedoucí: Horyl P.

Bakalářská práce se zabývá, renesančním obřím sudem na víno v původním stavu. Zásadní otázkou práce je posouzení nutnosti ocelových obručí na sudu. Porovnáním výsledků simulací numerických modelů sudu s obručemi a bez obručí, je dána na tuto otázku odpověď. Pro výpočtové modelování byla použita metoda konečných prvků v softwaru Ansys 12.0. Workbench[10]. Nejdříve bylo nutné určit materiálové charakteristiky dubového materiálu sudu. Ve výpočtu je materiál uvažován jako izotropní materiál. Rozměry sudu a většina okrajových podmínek modelu byla získána z návštěvy zámku v Mikulově a místnosti, kde je sud umístěn. Hlavním výsledkem práce je potvrzení nutnosti použití ocelových ztužujících pásů – obručí.

Annotation of bachelor thesis

Pončík M. Stress Analysis of the wine barrel of 100 Thousand l Located at Mikulov Castle, bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of mechanics, 2011, Thesis head: Horyl P.

My bachelor work is dealing with the giant wine barrel in original condition from Renaissance period. Basic question of the bachelor work is the requirement of steel hoops on the barrel. Answer to this question is given by comparison of results obtained from numerical models simulations of the barrels with hoops and without. For calculation modeling was used the method of finite elements by the software ANSYS 12.0. Workbench [10]. First step was to determine the material characteristic of oaken barrel. In the calculation the material is considered as an isotropic material. Proportions of the barrel and most of the boundary conditions were obtained during the visitation of chateau in Mikulov from the room where the barrel is placed. The main result of this work is confirmation that the steel bracing strips - the hoops are required.

Obsah bakalářské práce

1. Úvod	9
1.1. Popis sudu.....	10
1.2. Historie sudu.....	11
1.3. Výroba sudů dnes	12
1.4. Materiál sudu	14
1.5. Vlhkost dřeva	14
1.6. Mechanické vlastnosti dřeva	15
1.7. Stanovení konstant materiálu sudu.....	16
2. Výpočtové modelování modelu 1	17
2.1. Vytvoření geometrie sudu	17
2.2. Okrajové podmínky zatížení sudu.....	18
2.3. Okrajové podmínky	19
2.4. Generování sítě.....	20
2.5. Výsledky výpočtu modelu 1	21
3. Výpočtové modelování modelu 2	22
3.1. Síť modelu 2	22
3.2. Napětí modelu 2	23
3.3. Deformace modelu 2	24
3.4. Tlak na kontaktech - model 2	25
4. Výpočtové modelování modelu 3	26
4.1. Síť modelu 3	26

4.2.	Napětí modelu 3	27
4.3.	Deformace modelu 3	28
5.	Porovnání modelů 2 a 3	29
5.1.	Porovnání napětí sudů	29
5.2.	Porovnání deformace sudů	30
6.	Závěr	31
7.	Poděkování	32
8.	Použitá literatura	33
9	Přílohy	34

Seznam použitých značek a symbolů

$E_{\text{dub},r}$	Modul pružnosti ve směru vláken pro dub	[MPa]
$E_{\text{dub},k}$	Modul pružnosti napříč vlákny pro dub	[MPa]
μ_d	Poissonovo číslo pro dub	[-]
$\sigma_{\text{dub},\text{dov}}$	Dovolené napětí pro dřevo	[MPa]
$E_{\text{dub},r}$	Modul pružnosti oceli	[MPa]
μ_o	Poissonovo číslo pro ocel	[-]
$\sigma_{\text{ocel},\text{dov}}$	Dovolené napětí pro ocel	[MPa]
P	Tlak na stěny sudu	[Pa]
ρ	Měrná hmotnost vody	[kg/m ³]
h	Maximální výška hladiny	[m]
g	Gravitační zrychlení	[m/s ²]
k	Koeficient zatížení	[-]
σ_{kont}	Kontaktní tlak	[MPa]
f_{c90k}	Doporučený tlak kolmo na vlákno	[MPa]
k_{mod}	Koeficient zohlednění prostředí	[-]

1. Úvod

Dřevěné sudy jsou keltským vynálezem a nahradily od starověku používané kožené vaky nebo keramické nádoby (amfory) pro transport a skladování různého spotřebního zboží - od piva a vína, oleje, slanečků až po kvašené zelí, ale později také chemikálií, střelného prachu aj. Proslulý Diogenův sud, byl tedy ve skutečnosti velká nádoba z pálené hlíny (pithos) - zatímco první popis a postup výroby dřevěných sudů pochází až od Plinia st. (23 - 79 n. l.)

Sudy (prakticky v nezměněné podobě vyráběné až dodnes) jsou dřevěné nádoby složené z vydutých dužin spojených se dvěma kruhovými (sporadicky i elipsovíty) dny a stažené původně proutěnými, později téměř výhradně kovovými obručemi. V době Karla Velikého (8. stol.) se např. víno skladovalo již pouze v sudech, což současně s rozvojem vinařství a pivovarnictví vedlo i ke značnému rozmachu jejich výroby. Dlouhou dobu se rozlišovali bečváři - vyrábějící dubové „bečvy“, tj. těsné, transportní sudy (10 - 800 l) nepropustné pro kapaliny (víno, pivo, ocet, petrolej, oleje aj.), ale také ležácké sudy objemu až 100 hl pro vinařství a pivovarnictví - a bednáři - zhotovující nenáročné bečky, obvykle z měkkého dřeva, k přepravě pevných a sypkých hmot (cukr, cement, chemikálie, hnojiva aj.), případně různé nádoby (štoudve, škopky aj.).

Teprve později (od 17. století) se obě tato řemesla spojila pod jednotné označení cechu - bednářství. Od počátku 19. století se stalo bednářství již největším spotřebitelem zvláště dubového dříví, což vedlo k nedostatku surovin, problémům a hledání jejich řešení, importem a náhradními dřevinami.

Značná poptávka po těchto obalech přivedla současně jejich produkci od původní řemeslné, bednářské manufakturní práce až po strojní výrobu, s výkonem linek více než 1000 ks denně, která však s pozdějším poklesem odbytu postupně téměř zanikla a zachovala se převážně pouze ve své původní formě menších rukodělných dílen, kde se dosud praktikuje (s různými obměnami) jejich tradiční výrobní postup. [1]

1.1. Popis sudu

Sud měří na délku 621 cm, průměr hlavy je 447 cm, průměr přes střed neboli břicho 524 cm. Vyroben je z mohutných fošen (dužin) o tloušťce 15 cm, širokých v některých případech až 35 cm.



Obrázek 1 - Sud čelní pohled [7]

Ve spodní části předního dna jsou mohutná dvířka, vysoká 55 cm a široká 32 cm. Jsou dosti velká na to, aby se po jejich otevření mohl do nitra sudu vsoukat člověk a vyčistit jeho vnitřní stěny. Sud je po obvodu stažen 22 ocelovými obručemi, širokými 8 - 10 cm. Kromě toho zpevňují sud podélná ocelová táhla (celkem 21 kusů), procházející předním a zadním dnem. Pod každou hlavou nebo matkou je ocelová ozdobná podložka.

Lůžko se skládá ze tří mohutných trámů, ležících na podlaze sklepa a orientovaných v podélné ose sudu. Na nich v pravidelných rozestupech stojí 10 svislých žeber, na kterém sud leží a nedotýká se přitom země. Žebra jsou vysoká až 240 cm, nahoře jsou spojena ozdobnou římsou v délce sudu a liší se od sebe originální dřevořezbou. [2]



Obrázek 2 - Pohled na lože sudu [8]

1.2. Historie sudu

Bezkonkurenčně nejstarším sbírkovým předmětem ve vinařské sbírce na zámku Mikulov je renesanční obří sud na víno z roku 1643. Jeho stavbu si objednal majitel mikulovského panství Maximilián kníže z Dietrichsteina. Do sudu hodlal ukládat víno, vybrané jako daň od poddaných, kteří měli pronajaté jeho vinice. Byla to daň naturální ve formě vína nebo moštu, ale někdy se vlastníkům vinic odváděly hrozny nebo rmut. V některých dobách byly odvody finanční. Daň se skládala ze dvou částí - daň z půdy (perkrecht) a desátý díl úrody hroznů (desátek). Desátek měl u každé vrchnosti různou hodnotu. Také perkrecht býval různý - na Moravě se obvykle odvádělo jedno vědro (56,6 litru). Sud měl sloužit také k reprezentativním účelům, jak se to v 16. a v 17. století stalo módou.

Zhotovením mikulovského sudu byl pověřen brněnský bednář Christof Specht a ve smlouvě z 29. ledna 1643 se zavázal, že sud postaví do vinobraní. Lůžko vyráběl tesař z Innsbrucku, Bartolme Schütz. Dřevo bylo použito dubové, obruče jsou ocelové.

Mikulovský obří sud se ihned po svém vzniku stal středem obdivu. První písemná zmínka je z roku 1669. Brzy se také objevily první odhady o velikosti jeho objemu. V roce 1669 byl zveřejněn údaj 1700 věder (kolem 96 200 litrů). Jiný odhad - 2 000 věder (113 200 litrů) přetrval až do konce 19. století. Donedávna jsme považovali za nejsprávnější odhad z roku 1884, uvádějící 1786 věder a 9 mázů, což má být kolem 1010 hektolitřů. Na bývalé popisce u obřího sudu, která pochází někdy z období po 2. světové válce, bylo 1786 věder a 9 mázů přepočteno na 1010 hl a 81 litrů.

Sud byl po svém dokončení několik let nepřetržitě plněn desátkovým vínem. Traduje se 30 let, existuje však i údaj hovořící o 50 letech. Pravděpodobně neúroda v nepříznivém roce způsobila, že sud nemohl být naplněn, zůstal několik let prázdný a rozeschnul se. Jeho oprava se nepovedla, takže se přestal využívat jako obří nádoba. V roce 1719 přestál sud bez poškození požár, který zničil část zámku, a zůstal zachován jako kuriozita až do dnešních dní. [2]

1.3. Výroba sudů dnes

Dřevěné sudy se vyrábějí z dlouhodobě, přirozeně vyschlého dřeva (sudoviny), při dosažení jeho cca 20% vlhkosti - obvykle dubového s hustými letokruhy, ale také v menším rozsahu akátového aj. Dřevo na výrobu sudů (které se původně pouze štípalo) se alespoň řeže a hobluje tak, aby nedošlo k nežádoucímu porušení vláken a tím snížení pevnosti a zvýšení prodyšnosti finálních produktů. Podle požadovaného tvaru a objemu sudu se nejprve vypočtou rozměry, případně počet dužin a tloušťka obou den - a zhotoví se šablony, pomocí nichž se dužiny řezáním a hoblováním vytvarují. Dužiny, které jsou uprostřed nejširší, ale obvykle i nejslabší, se následně ohýbají do příslušného tvaru sudu tak, že se jedním koncem vyskládají do pracovní obruče a tento celek se umístí nad vyhřívaný kotlík s vodou, aby vyvíjenou parou došlo k určité plastifikaci dřeva. Pak se pomocí stahovacího lanového navijáku dužiny ohýbají a současně se na ně narážejí další pracovní obruče. Po dosažení konečného tvaru se tyto polotovary ještě tvarově fixují horkým vzduchem nad otevřeným ohněm spalovaných kousků tvrdého dřeva, případně i

hluboce vypalují (Heavy Toast), aby uložený nápoj získal charakteristickou kouřovou chuť. Při novodobé technologii je přímý oheň nahrazen cirkulací horkého vzduchu, která eliminuje riziko karbonizace dřeva. Celý proces je kontrolován softwarem, takže výsledky vypalování mohou být plně reprodukovány.



Obrázek 3 - Nasazování obruče na sud [9]

Pak se okraje pláště zarovnají a vytvoří se v nich drážky pro osazení den. Následuje postupné odstraňování pracovních obručí a sudy se "zabední" - opatří definitivními obručemi a nakonec se ručně ohoblují a vybrousí, aby se dosáhlo ideálního zaoblení a dokonale hladkého povrchu. [2]

Dna se vyrábějí z desek, které se vzájemně spojí na péro a drážku nebo na sraz kolíčky (ale i pouhým sklížením) - vyříznou se do požadovaného tvaru a po okrajích shoblují, aby dobře zapadly do drážky (útoru) v dužinách, a spáry mezi nimi respektive celá dna uložená v drážce se dokonale utěsní. Pro nasazení den se koncové obruče poněkud povolí a po zasazení se opětovně dokonale stáhnou, aby sudy byly plně funkční. Počet a tloušťka obručí z pásového železa (stočených a na koncích nýtovaných) se řídí účelem použití sudů; např. u pivních (více namáhaných) jsou silnější.

Válcový tvar dřevěných sudů umožňuje jejich nenamáhavé ruční přemísťování (kutálení) na krátkou vzdálenost a vydutí stěn pak ulehčuje snadnou změnu směru jejich pohybu. Současně se sudy mohou úsporně, podle potřeby a místních podmínek, skladovat ve vertikální nebo horizontální poloze; v druhém případě lze tekutinu čerpat z pípy ve dnu sudu. [2]

1.4. Materiál sudu

Dřevo je organický, nehomogenní, anizotropní a hygroskopický materiál. [3]

Dřevo má v různých směrech ke směru vláken rozdílné vlastnosti. Výrazně se od sebe liší vlastnosti dřeva sledované ve směru rovnoběžném s vlákny a kolmém k vláknům. Ve směru kolmém k vláknům se od sebe dále liší vlastnosti ve směru radiálním a tangenciálním. Nejlepší parametry pevnosti i tuhosti a zároveň nejmenší deformace od účinku teploty, sesychání či bobtnání má dřevo ve směru rovnoběžném s vlákny.

Chemické složení dřeva je u jednotlivých druhů suchých dřevin prakticky stejné jen málo kolísá okolo těchto hodnot - uhlík 49,5%, kyslík 44,2%, vodík 6,1%, dusík 0,2%. Uvedené prvky vytvářejí řadu složitých organických látek, z nichž nejdůležitější jsou celulóza, hemicelulózy, cukry, lignin, a tzv. Extraktivní látky, tj. doprovodné látky, které lze oddělit extrakcí (těkavé kyseliny, éterické oleje, alkoholy, barviva, minerální sloučeniny apod.

1.5. Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva je daná množstvím vody, které je ve dřevě obsaženo, tj. poměrem hmotnosti vody k hmotnosti sušiny dřevní hmoty. Voda se ve dřevě vyskytuje v podobě vody hygroskopicky vázané (obsažené ve stěně buněk) a vody volné (obsažené mimo stěny buněk). Do vlhkosti přibližně 30 % (podle druhu dřevin v rozmezí od 25 do 30 %) se voda nachází ve dřevě jako hygroskopicky vázaná. Vlhkost 30 % se nazývá bodem nasycení vláken a odpovídá stavu, při němž jsou všechny buněčné stěny nasyceny vodou. Hygroskopickým vlhnutím a vysycháním se zvětšuje a zmenšuje tloušťka buněčných stěn, a tím dochází k bobtnání a sesychání dřevěných prvků. [4]

1.6. Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanickými vlastnostmi dřeva rozumíme vlastnosti dřeva z hlediska pevnosti a pružnosti. Tyto vlastnosti závisí na charakteru zatížení (statické, dynamické, rázové) a na trvání (stálé, dlouhé, střednědobé, krátkodobé, okamžikové).

Konstrukční rozměry - se zvyšováním konstrukčních rozměrů prvků dochází ke zhoršení mechanických vlastností dřeva.

Objemová hmotnost- se zvětšováním objemové hmotnosti se zlepšují mechanické vlastnosti dřeva.

Vlhkost dřeva - se zvyšováním vlhkosti dřeva do meze nasycení vláken (30%) se jeho mechanické vlastnosti, především pevnost dřeva v tlaku, zhoršují. Vlhkost dřeva vyšší než 30% již nemá na zhoršení mechanických vlastností vliv.

Vady dřeva - (vysušené trhliny, suky, hniloba, poškození hmyzem atd.) zhoršují mechanické vlastnosti, především pevnost dřeva v tahu.

Rychlost zatěžování - se zvyšováním rychlosti zatěžování se pevnost dřeva v tahu zvětšuje.

Doba trvání zatížení - prodlužováním doby trvání zatížení pevnost dřeva klesá přibližně na 60% krátkodobé pevnosti dřeva. [4]

1.7. Stanovení konstant materiálu sudu

Pro výpočty sudu jsem vyhledal v literatuře zprůměrované hodnoty. [5] [6]

Tab1: Hodnoty materiálu a dovoleného napětí

Modul pružnosti ve směru vláken pro dub	$E_{\text{dub,r}} = 10000\text{MPa}$
Modul pružnosti napříč vláken pro dub	$E_{\text{dub,k}} = 5000\text{MPa}$
Poissonovo číslo pro dub	$\mu_{\text{d}} = 0,3$
Dovolené napětí pro dřevo	$\sigma_{\text{dub,dov}} = 40\text{MPa}$
Modul pružnosti oceli	$E_{\text{ocel}} = 2,1 \cdot 10^5\text{MPa}$
Poissonovo číslo pro ocel	$\mu_{\text{o}} = 0,3$
Dovolené napětí pro ocel	$\sigma_{\text{ocel,dov}} = 100\text{MPa}$

Modul pružnosti pro výpočet, jsem zvolil ve směru vláken dubu z důvodu spíše zlepšujících se vlastností při větší koncentraci vlhkosti ve dřevě.

2. Výpočtové modelování modelu 1

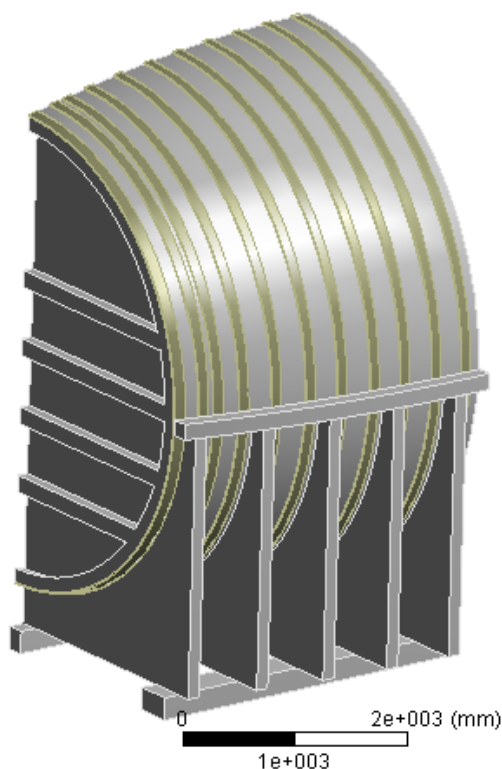
2.1. Vytvoření geometrie sudu

Výpočtový model sudu je vytvořen v prostředí softwaru Ansys 12.0 Workbench. Sud je vymodelován v původním stavu bez ocelových táhel, spojujících obě víka sudu, které byly přidány k sudu při opravě. Model je pouze čtvrtinový idealizovaný. Symetrii mohu použít z důvodu symetrických zatěžujících podmínek a symetrické geometrie sudu. Základ sudu, tvoří různě široké dužiny dřeva, které jsou v modelu spojeny do jedné části. Špunt a vrátka na víku nejsou vymodelovány, nahrazeny jednoduchými tvary.

Obruče, které se ve skutečnosti skládají z více částí, jsou vymodelovány jako celistvé obruče a to bez předpětí. Spoje s hřeby, které spojují část víka a sudu nejsou vymodelovány. Spojení jsem nahradil odpovídající mi vazbami, vetknutím. Lože sudu je vymodelováno bez dřevořezby. Žebra lože a římsa jsou idealizovány a nahrazeny jednodušší mi tvary pro snadnější vytvoření modelu.

Geometry
Solution
19.5.2011 1:05

□ Dub
■ Ocel

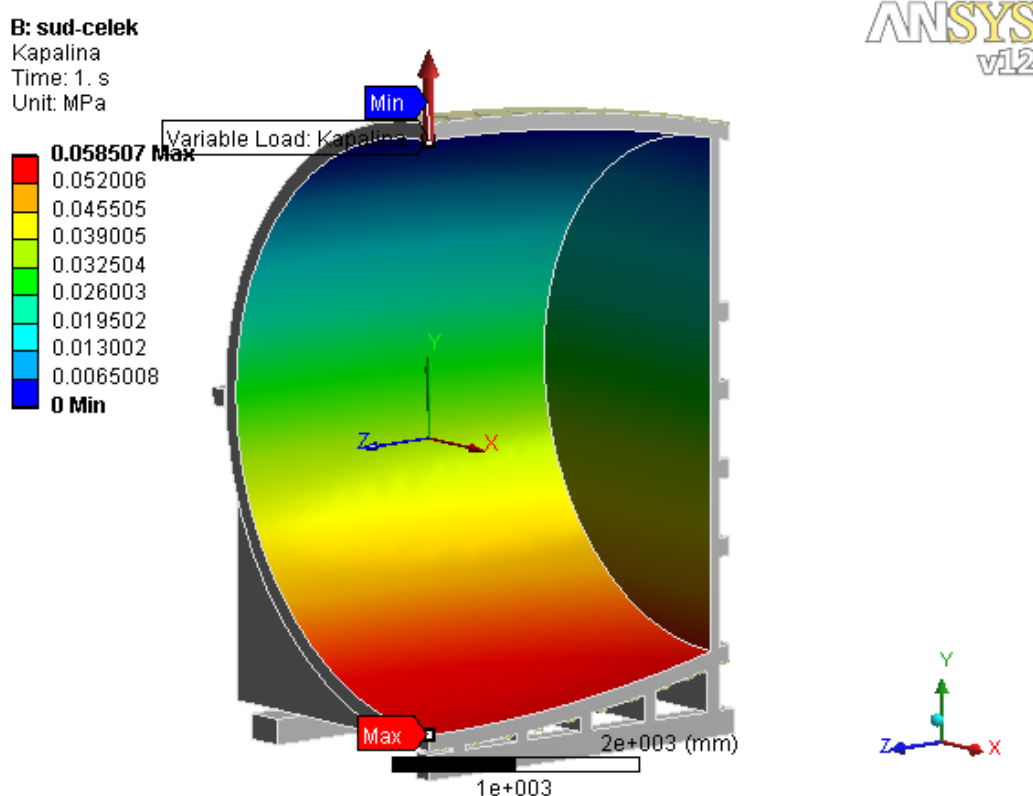


ANSYS
v12

Obrázek 4 - 3D čtvrtěční model sudu s obručemi

2.2. Okrajové podmínky zatížení sudu

Sud je zatížen od hydrostatického tlaku vína. Nulová hladina vína je volena tak aby odpovídala plně naplněnému sudu. Hydrostatický tlak je definován vzorcem $P = h \cdot \rho \cdot g$. Měrnou hustotu vína jsem zvolil podobnou, jako voda což odpovídá $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Dále jsem hustotu vynásobil pracovním koeficientem zatížení $k = 1,2$. Pracovní hustota $\rho_{\text{prac}} = 1200 \text{ kg/m}^3$. Hodnotu zrychlení jsem zvolil $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Nadefinované hodnoty sem zadal do materiálových vlastností softwaru Ansys 12.0 Workbench[10].



Obrázek 5 - Rozložení hydrostatického tlaku na stěny modelu

Dle obrázku 5 je maximální tlak v bodě největší výšky $h = 4,97 \text{ m}$, která je vypočtena z rozměru sudu „přes břicho“ s odebráním tloušťky sudu.

Kontrolní výpočet Maximálního tlaku

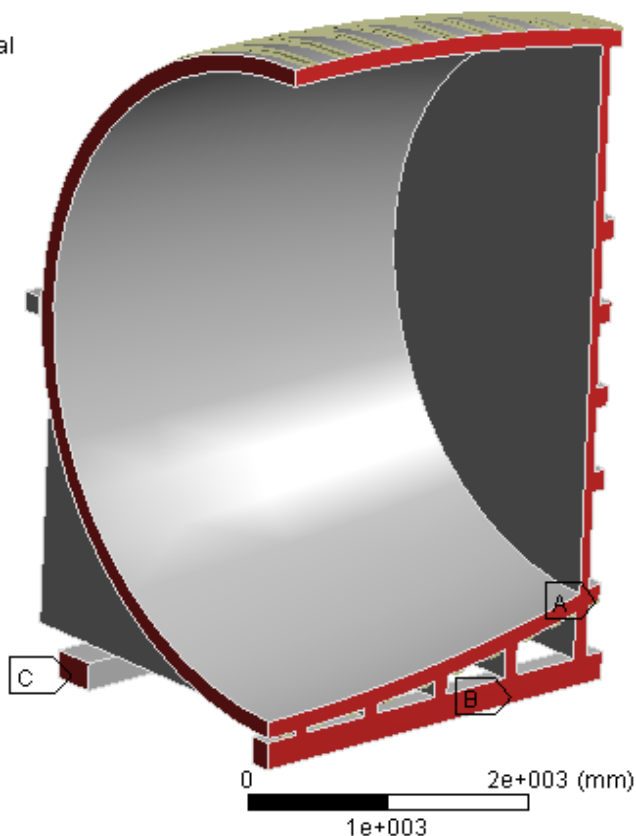
$$P = h \cdot \rho \cdot g = 4,97 \cdot 1200 \cdot 9.81 = 58506,84 \text{ Pa}$$

2.3. Okrajové podmínky

Na modelu 1 jsou zavedeny geometrické podmínky ve všech směrech globálního souřadného systému. Podmínky pro jednotlivé směry působí na jednotlivých plochách modelu 1, (viz. Obrázek 6.).

B: sud-celek
Static Structural
Time: 1. s

A Stop-x
B Stop-y
C Stop-z



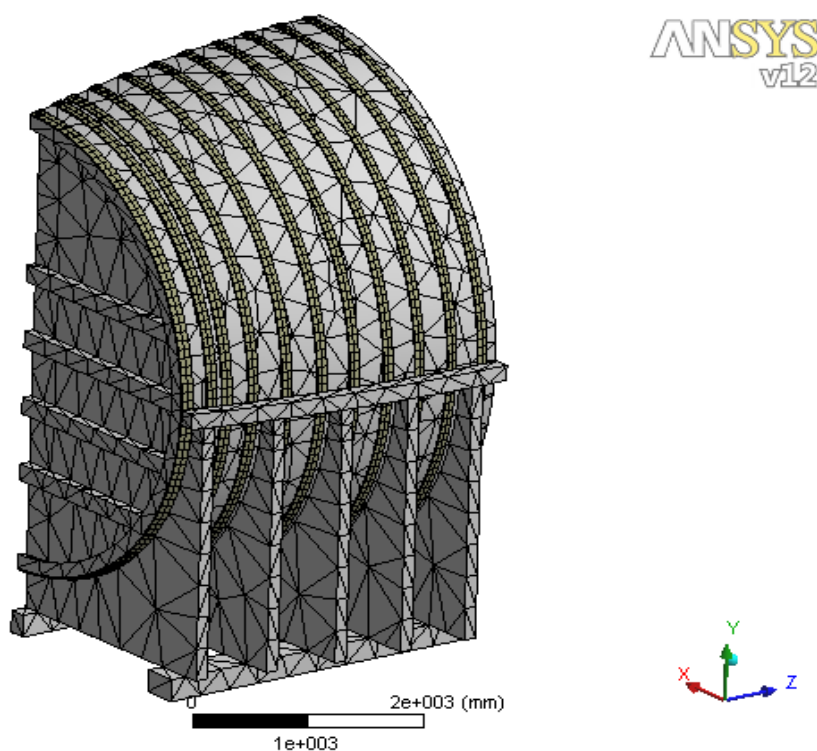
ANSYS
v12

Obrázek 6 - Okrajové podmínky uložení modelu 1

Na ploše A je okrajová podmínka, respektující symetrii sudu. Symetrie je nahrazena podmínkou zabráňující posunutí ve směru osy x (použité konečné prvky nebudou mít jako deformační parametry natočení). Plocha B, není zřetelně vidět na obrázku 6 jde o spodní plochy trámů, okrajová podmínka zabráňuje posunutí ve směru osy y. Jde v podstatě o kontakt sudu se zemí. Poslední okrajová podmínka na ploše C je daná symetrií sudu. Zde je odebrán pohyb ve směru osy z.

2.4. Generování sítě

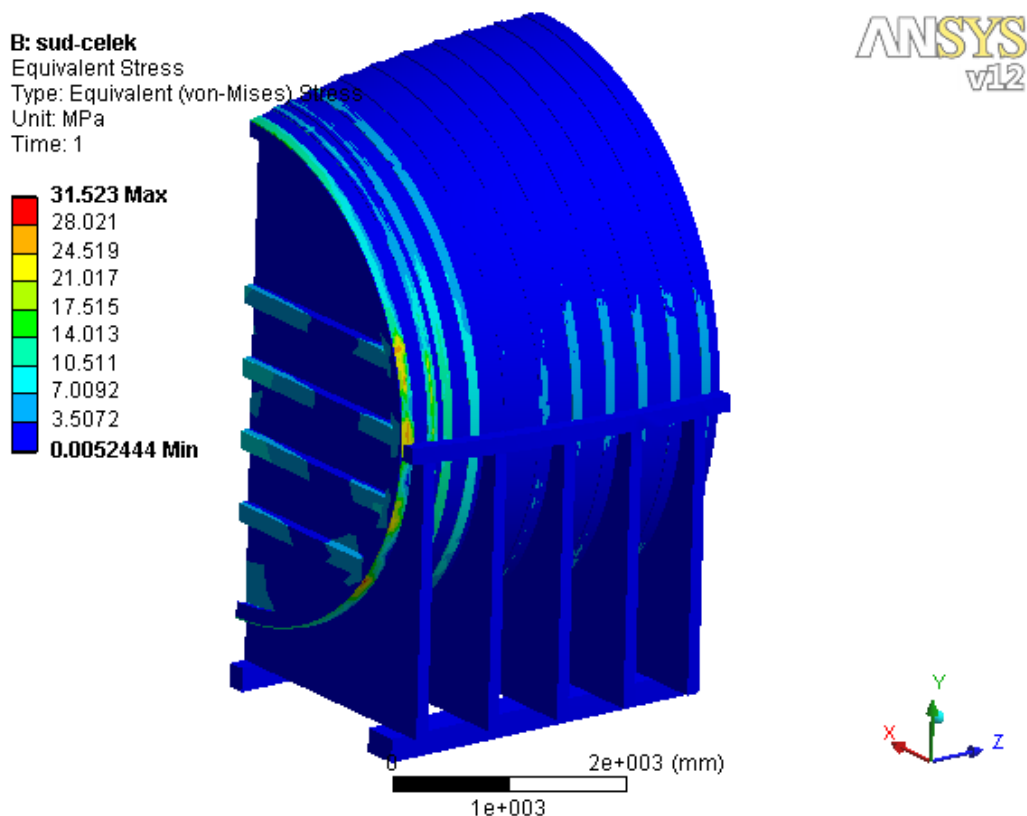
Pro první výpočet modelu jsem vygeneroval automatickou síť. Vygenerovaná síť (viz. Obrázek 7) je použita pro zjištění nejvíce zatížených míst modelu. Kontakty jednotlivých částí modelu 1 jsou pro tento výpočet svázány bez možnosti relativního pohybu (typ kontaktu bonded). Obruče, sud, lože a víko tudíž tvoří jednu společnou strukturu.



Obrázek 7 - Automaticky generovaná síť

2.5. Výsledky výpočtu modelu 1

Po prvním výpočtu, bylo zjištěno, že nejvíce zatížená je kontaktní část sudu a víka, a dále pak obruče poblíž víka (viz. Obrázek 8). Pro další výpočet je nutné zjemnit síť modelu v místě, největší koncentrace napětí. Nejvíce namáhaná místa se kupodivu shodují s modelem, s i bez obručí, jak bude dále prokázáno.



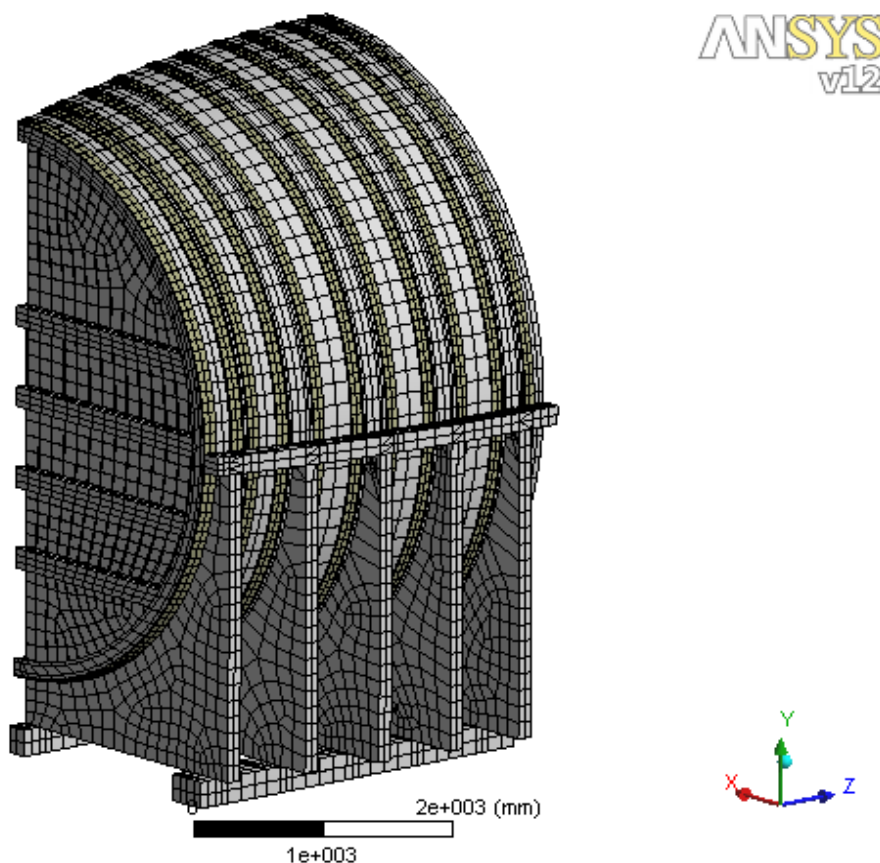
Obrázek 8 - Redukované napětí podle teorie HMH

3. Výpočtové modelování modelu 2

Model 2 je podobný modelu 1. Rozdíl je v tom, že model 2 je rozdělen na čtyři relativně samostatné části a to sud, víko, lože a obruče. Okrajové podmínky a zatížení jsou stejné jako u modelu 1.

3.1. Síť modelu 2

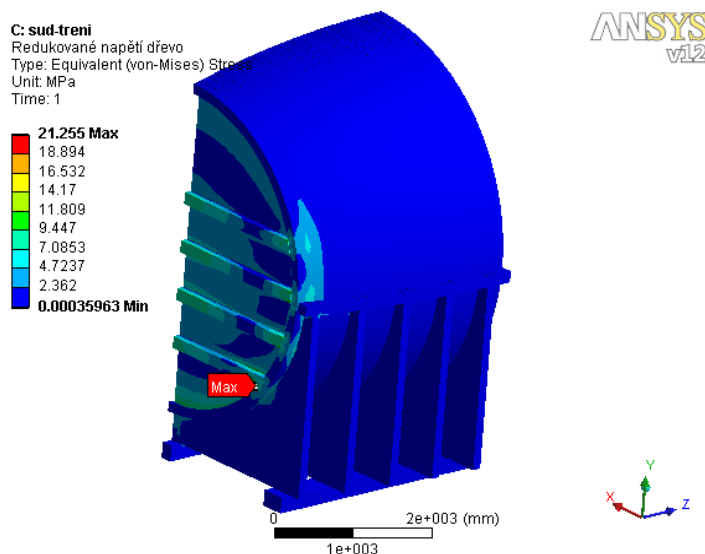
Síť modelu 2 je oproti modelu 1 zjemněná (viz. Obrázek 9). Kontakt sudu a lože je nastaven, bez možnosti relativního pohybu (typ kontaktu bonded). Víko a sud je nastaven stejně. Obruče a sud jsou spojeny třecím kontaktem s hodnotou tření 0,2, což odpovídá styku oceli a dřeva. Lože a ocelové obruče se nedotýkají, což na obrázku 10 není dobře patrné.



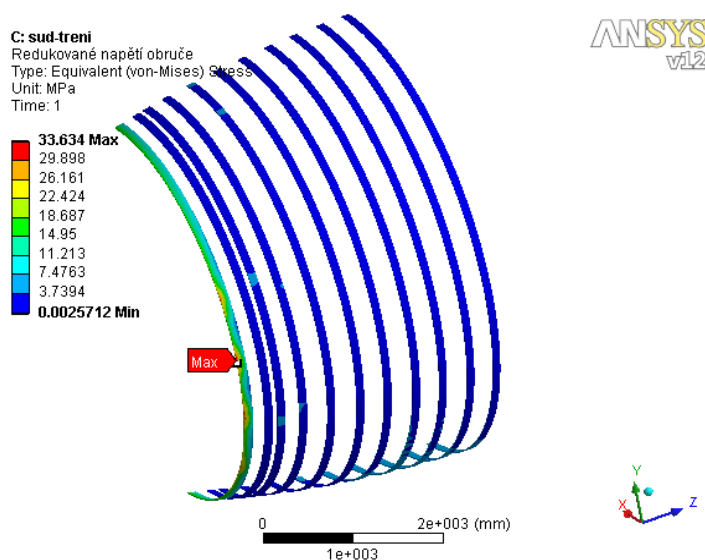
Obrázek 9 - Pravidelná „mapovaná“ síť modelu 2

3.2. Napětí modelu 2

Výsledky vypočteného napětí podle teorie HMM jsem rozdělil z důvodu vyhodnocení do dvou obrázků pro různost materiálů. Porovnání a posouzení je potom přehlednější. Ekvivalentní napětí u dřevěných částí modelu má maximální hodnotu (viz. Obrázek 10) 21,3 MPa, to je polovina dovolené doporučené hodnoty z tabulky 1. Ocelové části modelu obruče mají maximální vypočtenou hodnotu (viz. Obrázek 11) ekvivalentního napětí 33,6 MPa, to je jedna třetina dovolené hodnoty z tabulky 1.



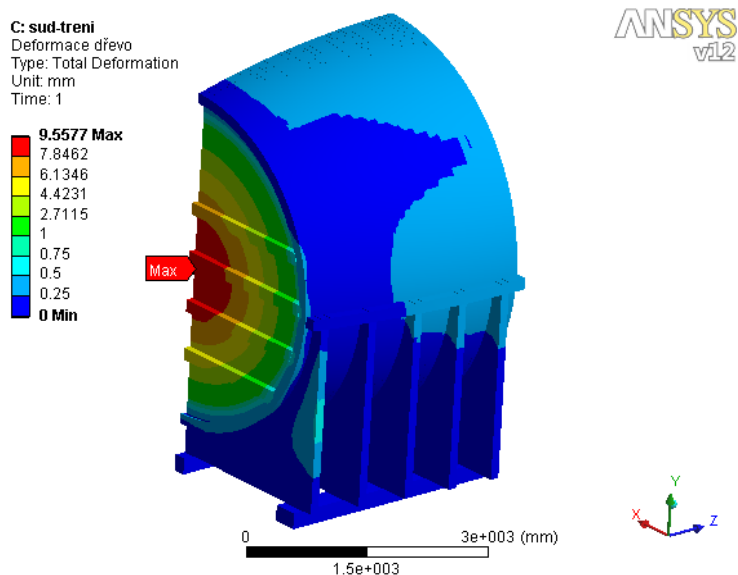
Obrázek 10 - Redukované napětí podle teorie HMM, materiál dřevo



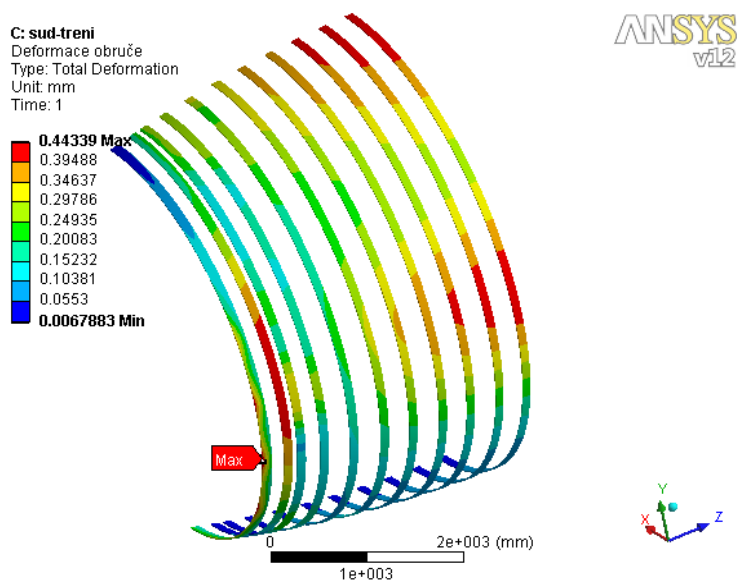
Obrázek 11 - Redukované napětí podle teorie HMM, ocelové obruče

3.3. Deformace modelu 2

Výsledky vypočteného posunutí na modelu jsem rozdělil z důvodu přehlednosti, vyhodnocení. Nejvíce deformovanou částí ze dřeva je střed víka sudu. Posunutí na víku se postupně od středu víka snižují. Na části si lze všimnout rovnoměrného rozložení a mírného zvětšení deformace přes „břicho sudu“. Ocelové obruče jsou nejvíce deformované poblíž „břicha sudu“.

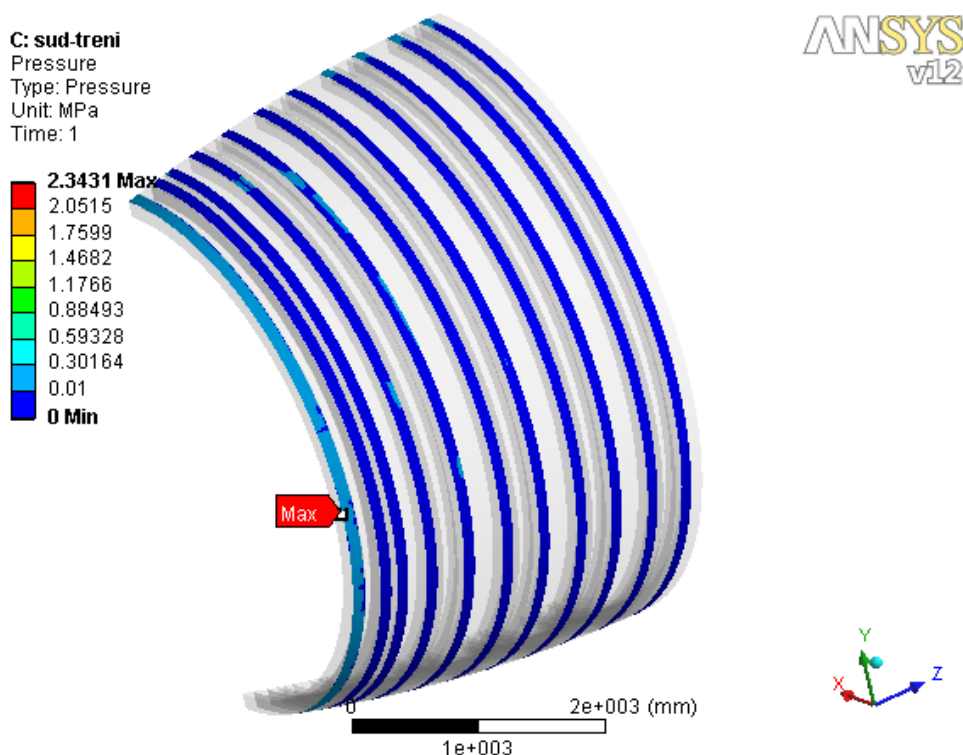


Obrázek 12 - Deformace dřevěného materiálu modelu 2



Obrázek 13 - Deformace ocelových obručí modelu 2

3.4. Tlak na kontaktech - model 2



Obrázek 14 - Rozložení tlaku na kontaktu sudu s obručemi

Vypočtené rozložení tlaku na kontaktu sudu s obručemi je rovnoměrné až na obruč poblíž víka, kde tlak nabývá maximální hodnoty $\sigma_{\text{kont}} = 2,34$ MPa.

Výpočet návrhové únosnosti tlaku podle eurokódu 5 [4]. Ve výpočtu jsou hodnoty, které zhodnocují dobu zatížení, vlhkost dřeviny, třídu kvality dřeva, tlak kolmo na vlákna dřeva (viz. Přílohy B-C). Hodnota vypočteného kontaktního tlaku je poloviční oproti dovolené hodnotě

$$\sigma_{\text{kont}} < f_{c90k} \cdot k_{\text{mod}}$$

$$2,34 < 9,7 \cdot 0,55$$

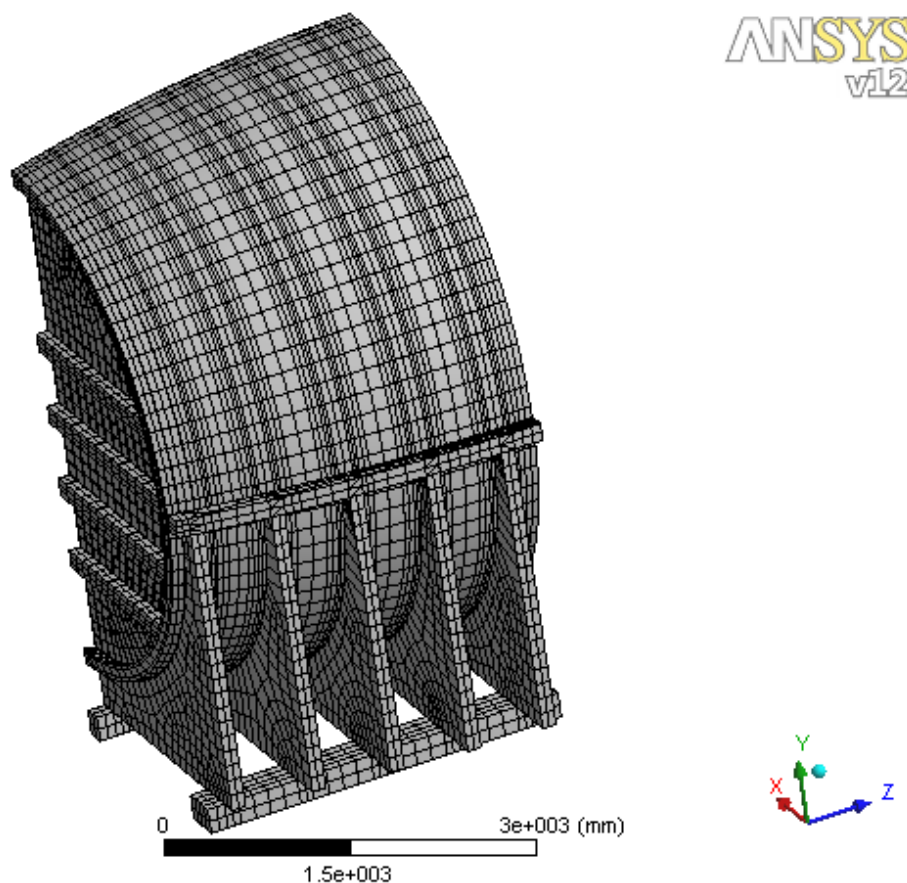
$$2,34 < 5,335$$

4. Výpočtové modelování modelu 3

Model je tvořen jen dřevěnými částmi bez ocelových obručí.

4.1. Sít' modelu 3

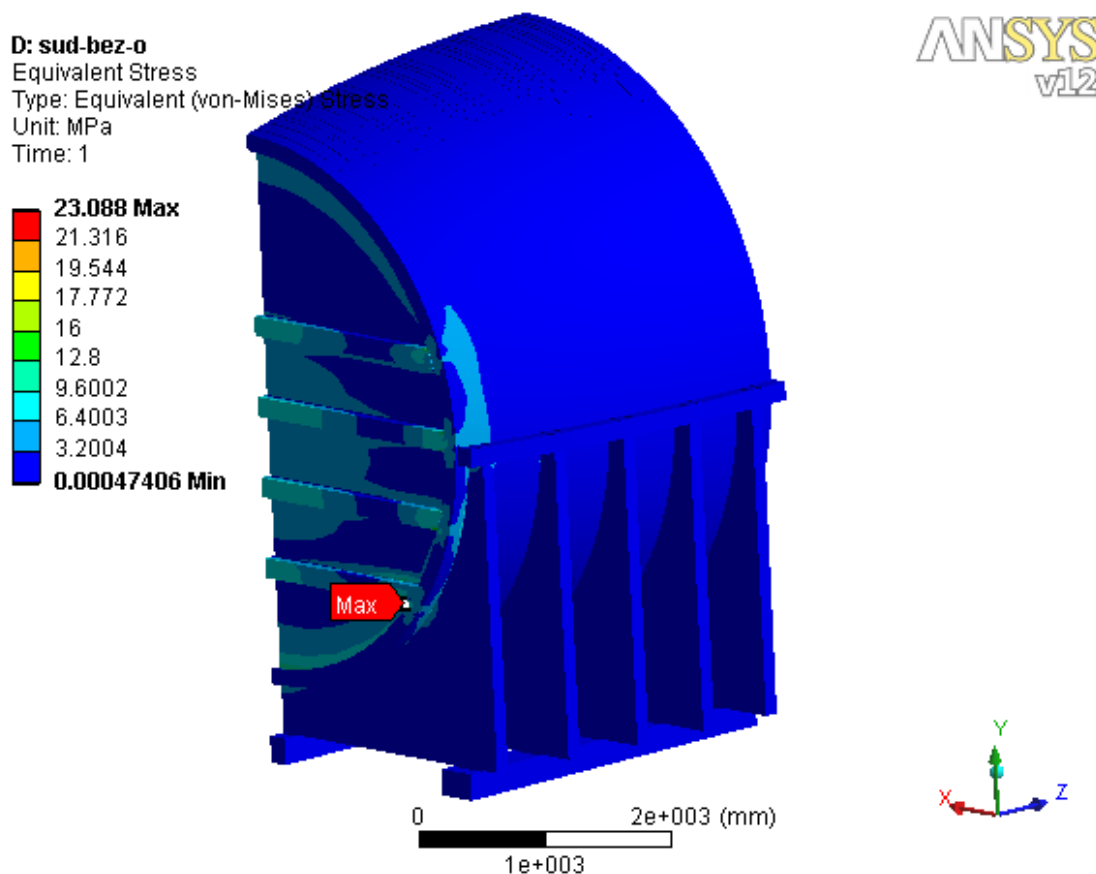
Sít' modelu je přejatá z modelu 2. Pro porovnání je odstraněna sít' obručí. Zachování sítě slouží k přesnějšímu porovnání výsledných výsledků.



Obrázek 15 - Pravidelně „mapovaná“ sít' modelu 3

4.2. Napětí modelu 3

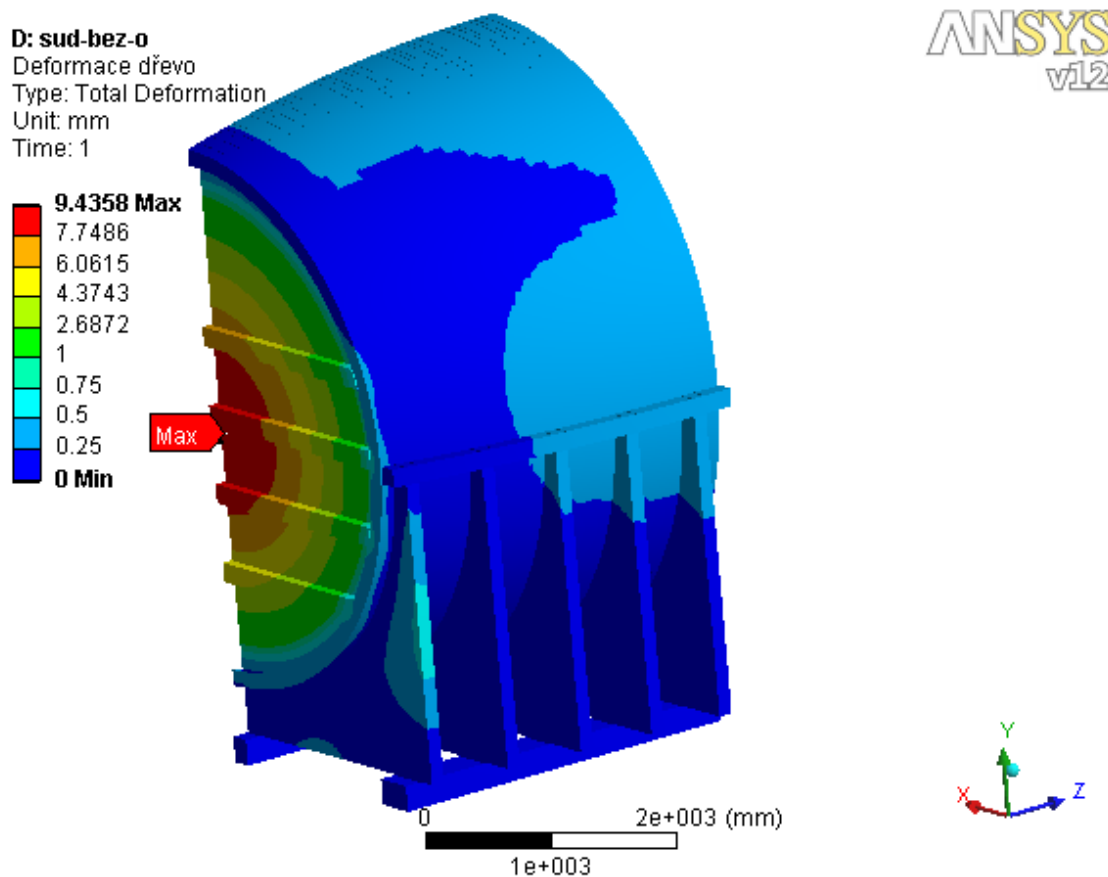
Ku podivu rozložení napětí na výpočtovém modelu se podobá s modelem 2. K porovnání modelu maximálního napětí 24 MPa, což je 1,6 násobek dovolené hodnoty z tabulky 1. V oblasti kontaktů sudu a víka dochází k vrubu, náhlé změně tvaru proto je nejvíce zatížena.



Obrázek 16 - Redukované napětí podle teorie HMM, modelu 3 bez obručí

4.3. Deformace modelu 3

Výpočet deformace modelu 3 je podobný jako model 2. Model bez obručí je ale v oblasti víka deformován o dvě procenta více než u modelu 2, s hodnotou 9.43 mm. Tato hodnota je zkreslená oproti realitě díky redukci dřeva na izotropní materiál. Lože modelu je poměrně více deformováno, než je tomu u modelu 2.



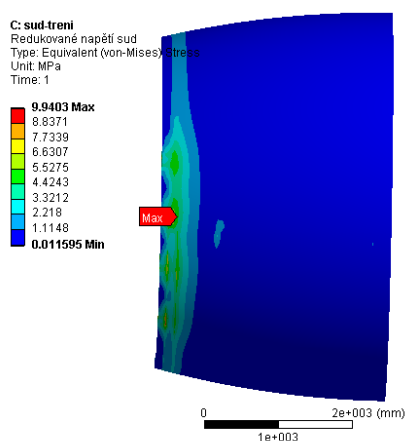
Obrázek 17 - Deformace modelu 3 bez obručí

5. Porovnání modelů 2 a 3

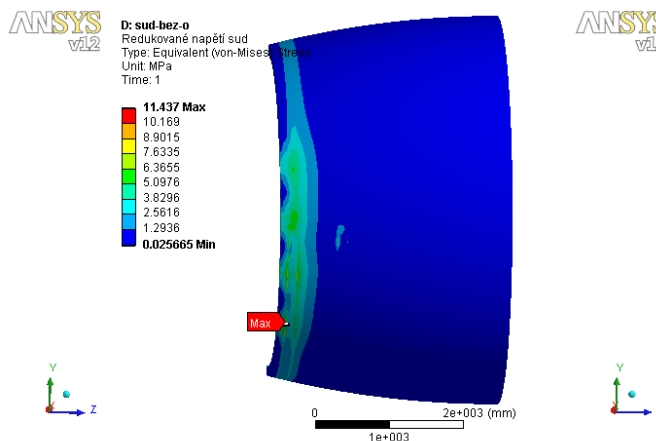
Z předešlých výpočtu kapitoly 3.2. a 4.2. je zřejmé že sud s obručemi má větší hodnotu bezpečnosti než bez obručí. Rozdíl hodnot je 25 %, ale konkrétně nehodnotí jednotlivou část sud. Proto v dalších podkapitolách porovnám jen část sudu modelu 2 a 3.

5.1. Porovnání napětí sudů

Porovnáním vypočtených napětí podle teorie HMM na obrázcích 18 a 19. Z vizuálního hlediska jsou oba modely sudu podobné, liší se jen v rozložení a hodnotách maximálních napětí.



Obrázek 18 - Napětí sud s obručí model 2

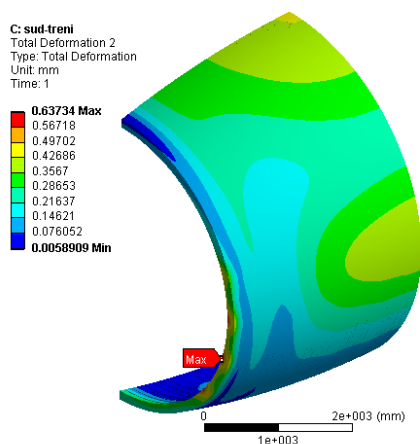


Obrázek 19 - Napětí sud bez obručí model 3

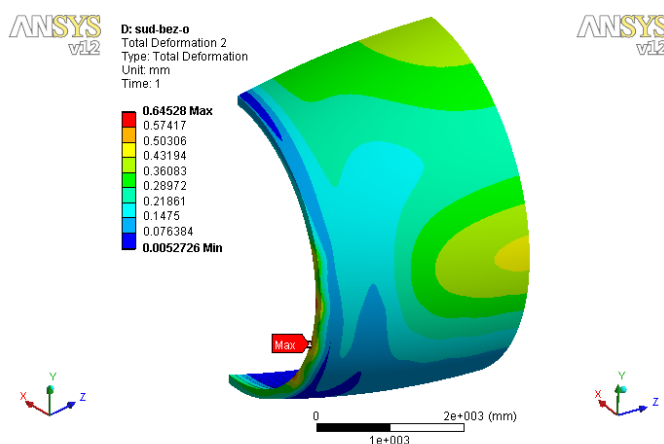
Hodnoty maximálního napětí pro sud s obručí je 9,9 MPa. Maximální napětí sudu bez obručí je 11,4 MPa. Porovnáním jednotlivých maxim získáme odchylku 15%, která není, zanedbatelná..

5.2. Porovnání deformace sudů

Rozložení deformace deformovaných částí sudů je podobná. Vliv obručí na první model má snahu rozložit deformaci rovnoměrně. Na sudu bez obručí se tvoří místa koncentrace deformace, která mohou způsobit škvíry mezi dužinami sudu a následný unik vína. Společná oblast maximální koncentrace deformace je stejná pro oba sudy je způsobem náhlé změny tvaru v kontaktu víka na sud. Hodnoty deformací jsou zkrácené pro reálný sud



Obrázek 20 - Deformace sud s obručí



Obrázek 21 - Deformace sud bez obručí

Hodnoty maximální posunutí sudu jsou 0,63 ku 0,64 mm (viz. Obrázky 20-21), což je rozdíl jeden a půl procenta.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo posouzení vlivu ocelových obručí na pevnostní vlastnosti sudu na víno. V úvodu práce byla popsána výroba a funkce sudu, dále byly popsány materiálové vlastnosti dřeva. Anizotropní materiálové vlastnosti dřeva byly nahrazeny izotropními. Na základě služební cesty byly zjištěny skutečné rozměry sudu, jeho jednotlivých částí a také byly získány zásadní poznatky o aplikaci okrajových podmínek. Na základě rozměrů byly vytvořeny dva idealizované modely sudu a jeho částí. Modely byly vymodelovány pouze čtvrtinové za použití dvou rovin symetrie. Symetrii jsem použil z důvodu symetrických zatěžujících podmínek a symetrické geometrie sudu.

Ocelové obruče se v realitě skládají z více částí a je možné, zvláštním, napínacím zařízením v nich vyvolalo předpětí. V této práci se idealizují a předpokládá se u všech modelů, že obruč je jeden celek bez předpětí.

Výsledky výpočtu pro modely 1 a 2 prokázaly pozitivní vliv obručí z hlediska zrovnoměnění rozložení napětí a deformace po obvodě sudu. Maximální hodnoty redukovaného napětí dle teorie HMM jsou poloviční, ve srovnání s dovoleným napětím.

Výsledky výpočtu modelu 3 prokázaly, že sud by mohl být sestaven bez obručí z hlediska pevnostního posouzení. Maximální hodnota redukovaného napětí dle teorie HMM jsem 1,6 krát menší, než hodnota dovoleného napětí. Předpokladem tohoto modelu je však celistvý sud, což není ve skutečnosti splněno.

Deformace vík sudů u modelu 2 a 3 jsou velmi vysoké. Proto asi po padesáti letech provozu byla víka sudu vyztužena podélnými táhly, která v původním provedení nebyla. Proto je počítačové modely neuvažují.

Ocelové obruče měly spíše za cíl zaručit předpětím těsnost sudu, z hlediska pevnostního je jejich funkce zanedbatelná, jak se v práci prokázalo.

7. Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Petru Horylovi, CSc., dr.h.c. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

8. Použitá literatura

- [1] Online: <http://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/obaly-ze-dreva-iii-drevene-sudy>
(dne 12.4.2011)
- [2] Online: <http://www.rmm.cz/czech/sud.html> (dne 12.4.2011)
- [3] KUKLÍK P., STUDNÍČKA J., Dřevěné a kovové konstrukce, Praha, 2006,
vydavatel: Informatorium, ISBN 80-7333-047-4
- [4] Eurokód 5 Navrhování Dřevěných konstrukcí – Část 1-1 : Obecná pravidla-
Společná pravidla pro pozemní stavby, 2006, ČSN EN 1995-1-1
- [5] LEINVEBER J., VÁVRA P., Strojnické tabulky- čtvrté doplněné vydání,
Praha, 2008, vydavatel: Albra – pedagogické nakladatelství, ISBN 978-80-
731-051-7
- [6] TREBUŇA F., ŠIMČÁK F., Odolnosť prvkou mechanických sústav, Košice,
vydavatel: Technická univerzita v košiciach, ISBN 80-8073-148-9

Obrázky:

- [7] online: <http://www.rmm.cz/fotogallery/expozice/sud/foto2.html>
(dne 10.5.2011)
- [8] online: <http://www.rmm.cz/fotogallery/expozice/sud/foto1.html>
(dne 10.5.2011)
- [9] online: <http://www.prazdroj.cz/userdata/news/bednari-sudy14.jpg>
(dne 10.5.2011)

Použitý software

- [10] ANSYS® Academic Teaching Advanced, Release 12.0

9 Přílohy

Seznam příloh

A-seznam obrázků

B-Pevnostní charakteristiky jehličnatého a listnatého řeziva dle ČSN EN 338

C-Vliv provozu a délky trvání zatížení na únosnost $-k_{\text{mod}}$

Příloha A-seznam obrázků

Obrázek 1 - Sud čelní pohled [7]	10
Obrázek 2 - Pohled na lože sudu [8]	11
Obrázek 3 - Nasazování obruče na sud [9]	13
Obrázek 4 - 3D čtvrtěčný model sudu s obručemi	17
Obrázek 5 - Rozložení hydrostatického tlaku na stěny modelu	18
Obrázek 6 - Okrajové podmínky uložení modelu 1	19
Obrázek 7 - Automaticky generovaná síť	20
Obrázek 8 - Redukované napětí podle teorie HMM	21
Obrázek 9 - Pravidelná „mapovaná“ síť modelu 2	22
Obrázek 10 - Redukované napětí podle teorie HMM, materiál dřevo	23
Obrázek 11 - Redukované napětí podle teorie HMM, ocelové obruče	23
Obrázek 12 - Deformace dřevěného materiálu modelu 2	24
Obrázek 13 - Deformace ocelových obručí modelu 2	24
Obrázek 14 - Rozložení tlaku na kontaktu sudu s obručemi	25
Obrázek 15 - Pravidelně „mapovaná“ síť modelu 3	26
Obrázek 16 - Redukované napětí podle teorie HMM, modelu 3 bez obručí	27
Obrázek 17 - Deformace modelu 3 bez obručí	28
Obrázek 18 - Napětí sud s obručí model 2	29
Obrázek 19 - Napětí sud bez obručí model 3	29
Obrázek 20 - Deformace sud s obručí	30
Obrázek 21 - Deformace sud bez obručí	30

Příloha B - Pevnostní charakteristiky jehličnatého a listnatého řeziva dle ČSN EN 338

	Topol a jehličnaté dřeviny												Listnaté dřeviny						
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Pevnostní vlastnosti v N/mm ²																			
Ohyb		14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
Tah rovnoběžně s vlákny		8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
Tah kolmo k vláknům		0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Tlak rovnoběžně s vlákny		16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
Tlak kolmo k vláknům		2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Smyk		1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Tuhosti vlastnosti v kN/mm ²																			
Průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	E _{0,mean}	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
5% kvantil modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	E _{0,05}	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo k vláknům	E _{90,mean}	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku	G _{mean}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Hustota v kg/m ³																			
Hustota	P _k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900
Průměrná hodnota hustoty	P _{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080

Příloha C-Vliv provozu a délky trvání zatížení na únosnost $-k_{mod}$

Materiál	Norma	Třída provozu	Třída trvání zatížení				
			Stálé zatížení	Dlouho- dobé zatížení	Středně- dobé zatížení	Krátko- dobé zatížení	Okamžikové zatížení
Rostlé dřevo	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Lepené lamelové dřevo	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Překližka	EN 636						
	Část 1, Část 2, Část 3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Část 2, Část 3	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Část 3	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
OSB	EN 300						
	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	OSB/3, OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	OSB/3, OSB/4	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Třísková deska	EN 312						
	Část 4, Část 5	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	Část 5	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
	Část 6, Část 7	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
Vláknitá deska, tvrdá	EN 622-2						
	HB.LA, HB.HLA 1 nebo 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	HB.HLA1 nebo 2	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Vláknitá deska, středně tvrdá	EN 622-3						
	MBH.LA1 nebo 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MBH.HLS1 nebo 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
Vláknitá deska, MDF	EN 622-5						
	MDF.LA, MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MDF.HLS	2	–	–	–	0,45	0,80